第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

六盘山半干旱区华北落叶松林坡面土壤含水量的降雨响应

石建周[1,2]， 刘贤德[1,3]， 田 青[1]， 于澎涛[2]， 王彦辉[2]

(1. 甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070；2. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所,北京 100091；3. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院,甘肃 张掖 734000)

摘 要： 在宁夏六盘山外围半干旱区,土壤含水量是影响林木成活与生长的关键因子,需深入理解森林坡面不同坡位的土壤含水量对降雨量的响应差异。本文在宁夏六盘山叠叠沟小流域,选择一个华北落叶松人工林典型坡面,于2021年5—10月利用自动气象站和土壤水分仪连续监测降雨等气象条件和坡面土壤含水量变化,分析土壤含水量的坡位差异及对降雨量级的响应。观测期间总降水量为443.7 mm,虽然接近多年平均值,但夏季干旱严重。结果表明:(1) 土壤含水量存在明显的生长季内变化,整体表现为先降低后升高的趋势,8月最低(0.112 $m^3 \cdot m^{-3}$)。(2) 土壤含水量存在明显的坡位差异,整体表现为:上坡[(0.191±0.044) $m^3 \cdot m^{-3}$] > 中坡[(0.158±0.045) $m^3 \cdot m^{-3}$] > 下坡[(0.146±0.034) $m^3 \cdot m^{-3}$],表明土壤含水量的坡位变化因处于干旱年,主要受植被蒸散耗水量大小的影响,而受坡面汇流影响不大。(3) 在同一降雨量级时,因受土壤孔隙度和持水能力、林下草本截持、优先流等的影响差异,中坡的土壤含水量对降雨量增加的响应最敏感,其次是上坡,下坡最不敏感。(4) 在本研究区,降雨以<10 mm的小降雨事件为主,7 mm是形成有效降雨的阈值,超过此阈值的降雨才有可能缓解0~20 cm土层土壤干旱和补给该层土壤水分。本研究有助于理解半干旱山区森林坡面的土壤含水量大小变化与分布特征,指导确定基于坡面土壤水分的植被承载力和进行林水综合管理。

关键词： 半干旱区；六盘山；华北落叶松；土壤含水量；坡位差异；降雨补给

土壤水分作为土壤-植被-大气连续体的一个重要组分[1],是限制干旱半干旱区森林植被恢复和生长的关键因子[2]。大气降雨作为土壤水分的重要来源[3],深刻影响着土壤含水量的大小和其坡位差异,进而影响森林植被的稳定性[4]。

近年来,越来越多的学者开始关注旱区的土壤水分变化及其降雨响应特征,例如在黄土丘陵区,天然草地坡面的土壤水分明显存在下坡 > 中坡 > 上坡的坡位差异[5];随着土层深度的增加,乔木林地土壤含水量先迅速降低后趋于平稳,灌木林地土壤含水量呈先降低后升高,而撂荒草地和农地土壤含水量先逐渐升高后趋于稳定[6];农耕地的土壤含水量始终高于撂荒地,同时其土壤含水量增量和响应深度均随降雨量增加而呈增大趋势[7];在太行山区南麓,降雨是土壤水分的主要来源,降雨量是影响土壤水分补给深度的决定因素,对应0~10 mm、10~25 mm、25~50 mm、> 50 mm的4个降雨量级,荆条灌丛土壤水分补给深度分别为10 cm、20 cm、60 cm、80 cm[8];在荒漠草原区,降雨的土壤水分影响主要集中在浅层(0~40 cm),而在深层影响较小[9]。目前,对土壤水分动态及其降雨响应的研究集中在荒漠草原和黄土高原等干旱半干旱区[8],而在六盘山这样的土石山区研究森林坡面的土壤水分降雨响应还较少。

六盘山区是我国西北地区的主要水源地和水源林区,在这里已开展了有关土壤水分变化的一些监测与研究,如在半干旱区,表层土壤含水量对降雨响应明显,且各土层的降雨响应存在时间滞后,同时

收稿日期： 2022-02-28； **修订日期：** 2023-02-05
基金项目： 甘肃省中央引导地方科技发展资金项目(22ZY2QG001)；甘肃省科技计划(创新基地和人才计划)项目(21JR7RA058)
作者简介： 石建周(1993-),男,硕士研究生,主要从事森林生态水文研究. E-mail: 2608369439@qq.com
通讯作者： 刘贤德. E-mail: shyliuxiande@163.com

在大雨条件下有明显的侧向流发生[10]；土壤前期的含水量会影响到土壤含水量对降雨响应的时间[11]。但这些研究集中在样地尺度上，还缺乏坡面尺度上的土壤含水量降雨响应研究。坡面是森林植被恢复、林业生产规划、流域内水资源和森林植被综合管理的基本空间单位[12]，旱区坡面上的森林植被生长特征的坡位差异与土壤水分条件紧密相关。因此，研究坡面土壤水分的降雨响应，对合理确定不同坡位的土壤水分植被承载力以及指导基于水分承载力的林水协调管理有重要意义。

本研究在宁夏六盘山半干旱区叠叠沟小流域，选择华北落叶松林的典型坡面，探讨在生长季内不同坡位的土壤含水量动态变化及其对次降雨量的响应，量化降雨量大小对土壤水分的补给作用，以期为理解旱区森林坡面上土壤含水量的降水响应规律提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于宁夏六盘山北部的叠叠沟小流域（106°4′55″~106°9′15″E，35°54′12″~35°58′33″N），小流域面积为25.4 km²，海拔为1975~2615 m，坡度变化范围约10°~42°，土壤类型为灰褐土和黄土。气候属于半干旱大陆性季风气候，年均气温7.9 ℃，年均降水量451 mm，降雨主要集中在6—9月，无霜期130 d（2002—2019年，固原气象站）。

在该小流域内，乔木林多分布在水分条件相对较好的阴坡或半阴坡，约占小流域面积的6.1%，以华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）、油松（*Pinus tabuliformis*）、白桦（*Betula platyphylla*）、青海云杉（*Picea crassifolia*）等人工林为主；灌丛约占小流域面积的18.4%，以自然生长的沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、虎榛子（*Ostryopsis davidiana*）等为主；天然草地主要分布在阳坡和半阳坡，约占小流域面积的58.7%，主要种类包括披针叶苔草（*Carex lancifolia*）、穗花马先蒿（*Pedicularis spicata*）和铁杆蒿（*Artemisa vestita*）等[10]。

1.2　样地设置

在叠叠沟小流域，选择了一个半阴坡、平均坡度27°的华北落叶松人工林典型坡面，在其上坡、中坡和下坡坡位，各布设1个20 m×20 m的标准样地（表1）。该坡面的林分平均密度为1792株·hm⁻²，林龄32 a，林冠郁闭度平均为0.75；平均树高7.81 m，平均胸径10.7 cm，平均枝下高2.3 m，平均冠幅直径为2.9 m。林下灌木主要有绣线菊（*Spiraea salicifolia*）、胡枝子（*Lespedeza bicolor*）、蔷薇（*Rosa multiflora*）等，盖度约5%；林下草本层主要有针叶苔草（*Carex lancifolia*）、穗花马先蒿（*Pedicularis spicata*）等，总盖度约80%，草本生物量约3.85 t·hm⁻²；枯落物平均厚度3.46 cm，枯落物生物量约为9.89 t·hm⁻²。

1.3　降雨量测定

在林外开阔处，安装一台Wheatherhawk-232（Campbell Scientific，美国）自动气象站，连续定位监测降雨量等气象因子，数据记录频率为5 min 1次。本研究观测时段为2021年5月1日至10月31日。

根据Zhu等[13]在黄土高原等地区的研究，规定将时间间隔＞6 h的降雨作为2次独立降雨事件。根据国家气象局划分标准，日降雨量＜10 mm为小雨，10~25 mm为中雨，25~50 mm为大雨，>50 mm为暴雨。本文参照研究期间降雨等级分布，从50场降雨事件中选取至少前一天无降雨的小雨5场（5/36场）、中雨6场（6/11场）、大雨2场（全部）、暴雨1场

表1　研究坡面不同坡位的华北落叶松人工林样地信息

Tab. 1　The plot information of *Larix principis-rupprechtii* plantation on different slope positions

样地	坡度/(°)	坡位	海拔/m	林龄/a	密度/(株·hm⁻²)	林冠郁闭度	平均胸径/cm	平均树高/m	平均枝下高/m	平均冠幅/m	草本总盖度/%	草本生物量/(t·hm⁻²)	枯落物层厚度/cm	枯落物生物量/(t·hm⁻²)
H1	28	上坡	2145	32	1550	0.69	11.33±3.17a	7.76±1.82a	2.05±0.79b	3.02±0.80a	70±5b	2.36±0.20c	3.25±0.31ab	9.82±1.15ab
H2	24	中坡	2090	32	1750	0.73	10.89±3.46a	7.84±2.29a	2.76±1.26a	3.01±1.02a	75±6b	2.99±0.24b	4.00±0.32a	12.04±1.48a
H3	34	下坡	2040	32	2075	0.82	9.91±4.42a	7.83±2.63a	2.09±1.42ab	2.72±1.05a	95±3a	6.19±0.16a	3.13±0.28b	7.82±0.65b

注：表中数据为平均值±标准差；同列内不同小写字母表示不同土层之间在0.05水平上存在显著差异。下同。

(全部),分析土壤水分含量对不同降雨事件的响应过程。

1.4 土壤含水量测定

考虑到华北落叶松的根系主要分布在60 cm土层以内,于2020年5月在研究坡面的上坡、中坡、下坡3个样地,按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层深度,布设土壤水分监测仪器5-TE(Decagon,美国),并用EM50数据采集器(Decagon,美国)记录各层土壤含水量变化,数据记录频率与降雨量监测频率同步。为减少土壤扰动影响土壤水分监测,传感器安装在相应位置后,将原来的土壤回填,使用数据时间段为2021年5月1日至10月31日。

为描述土壤含水量的降雨响应程度,用土壤水分增量(VWC_{ad},mm)表征次降雨的土壤水分补给。

$$VWC_{ad} = \left(VWC_a - VWC_b\right) \times h$$

式中:VWC_a为某次降雨后的土壤体积含水量的峰值($m^3 \cdot m^{-3}$);VWC_b为某次降雨前的土壤体积含水量($m^3 \cdot m^{-3}$);h为土层厚度(mm)。

1.5 土壤物理性质测定

2021年6月,在每个坡位样地中,沿对角线挖3个土壤剖面(宽0.8 m、长1 m、深1 m),土壤厚度不足1 m时挖深至基岩风化层,然后记录土壤分层结构,并利用机械分层的方法在0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm处,使用100 cm^3环刀取原状土,每层3个重复,带回室内测定土壤水分、容重、孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量等水文物理性质(表2)。

1.6 数据处理

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 21进行数据整理和统计分析,采用单因素方差分析比较不同坡位各土层土壤含水量之间的差异显著性,采用Origin 2018软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

在2021年生长季(5—10月),叠叠沟小流域发生降雨事件50次,总降雨量443.7 mm,但各月降雨

表2 不同坡位样地0~100 cm土层的土壤物理性质

Tab. 2 Soil physical properties of 0-100 cm soil layer at different slope positions

坡位	土层深度/cm	土壤容重/($g \cdot cm^{-3}$)	土壤饱和持水率/%	土壤毛管持水率/%	土壤田间持水率/%	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	饱和导水率/($mm \cdot min^{-1}$)
上坡	0~10	0.89±0.05c	71.55±7.48a	52.41±1.45ab	49.23±1.88a	16.81±4.71a	46.57±2.11ab	1.22±0.64a
	10~20	0.96±0.02c	65.29±2.51a	55.16±8.88a	49.52±4.75a	9.82±7.75ab	52.75±7.39a	1.36±0.54a
	20~40	1.09±0.07b	51.48±5.83b	45.55±2.72bc	42.53±2.05b	6.29±4.46b	49.57±2.52ab	0.94±0.12a
	40~60	1.10±0.07b	49.63±5.76b	40.43±2.44cd	38.12±2.41b	9.99±3.40ab	44.53±0.69b	1.16±0.33a
	60~80	1.25±0.02a	40.27±1.40c	35.91±2.76d	32.64±2.05c	5.44±2.91b	44.96±3.58b	0.92±0.26a
	0~80	1.11±0.14b	50.66±12.31b	42.16±8.42c	39.14±7.54b	9.01±4.01ab	46.14±3.87ab	1.12±0.19a
中坡	0~10	0.94±0.05d	66.22±4.18a	53.78±2.91a	51.17±3.24a	11.64±0.64a	50.42±0.67a	1.58±0.70a
	10~20	1.06±0.12c	55.15±9.97b	42.11±4.40b	39.94±4.54b	13.23±6.24a	44.20±3.15b	1.58±0.48a
	20~40	1.08±0.01bc	52.35±1.85bc	42.09±2.46b	38.84±2.12b	11.09±0.84a	45.45±2.07ab	1.72±0.79a
	40~60	1.11±0.03bc	49.99±4.06bc	40.25±4.46b	38.32±4.51b	10.77±2.79a	44.56±4.22b	1.71±1.12a
	60~80	1.20±0.07ab	43.15±5.25cd	34.93±1.45cd	32.84±0.41cd	9.59±5.69a	41.82±3.15b	1.12±0.20a
	80~100	1.27±0.07a	38.66±4.56d	32.74±1.29d	30.66±1.46d	7.25±6.26a	41.48±3.31b	1.04±0.29a
	0~100	1.13±0.11bc	48.97±9.65bc	39.59±7.37bc	37.24±7.16bc	10.23±2.03a	44.12±3.23b	1.46±0.30a
下坡	0~10	0.93±0.05c	66.53±7.30a	54.34±11.36a	47.15±10.99a	11.46±8.14a	50.51±8.46a	5.29±5.93a
	10~20	1.02±0.04bc	57.63±4.56ab	54.15±3.73a	47.62±4.37a	3.53±1.51a	55.31±2.15a	3.50±2.97a
	20~40	1.06±0.02b	52.33±2.67bc	44.77±7.33ab	38.85±6.30ab	8.09±5.24a	47.34±6.73a	4.09±3.60a
	40~60	1.09±0.07ab	51.41±5.70bc	45.53±5.48ab	39.24±5.08ab	6.25±6.12a	49.44±5.34a	3.14±1.82a
	60~80	1.13±0.12ab	48.43±10.64bc	42.48±8.90ab	36.99±8.38ab	6.56±3.01a	47.26±4.85a	2.37±2.15a
	80~100	1.18±0.02a	43.95±2.09c	39.45±2.42b	34.55±2.88b	5.24±5.15a	46.67±3.79a	1.49±0.86a
	0~100	1.09±0.09ab	51.64±7.87bc	45.29±6.15ab	39.40±5.42ab	6.73±2.71a	48.72±3.24a	3.31±1.33a

量分配不均，在5—8月降雨稀少，累计降雨量仅147.7 mm（占33.3%）；而在9—10月降雨较集中，累计降雨量296 mm（占66.7%）（图1a）。

研究期间以＜10 mm的小降雨事件为主，共36场，占总降雨场次的72%；累计降雨量138.7 mm，占总降雨量的31.3%。降雨量10~25 mm的中雨共11场，累计降雨量173 mm，占总降雨量的39%。降雨量25~50 mm的大雨共2场，降雨量分别为34 mm和41 mm，占总降雨量的16.8%；降雨量＞50 mm的暴雨共1场，降雨量57 mm（图2）。

2.2 土壤含水量时空变化特征

0~60 cm土层的平均土壤含水量有明显的生长季内变化（图1），整体表现为先降低后升高的趋势。其中，在5—8月土壤含水量持续降低，其平均值为0.149 $m^3 \cdot m^{-3}$，变化范围为0.109~0.226 $m^3 \cdot m^{-3}$；在降雨较集中的9—10月，土壤水分整体得到补充，平均值为0.196 $m^3 \cdot m^{-3}$，变化范围为0.136～0.236 $m^3 \cdot m^{-3}$。

各土层平均土壤含水量在不同坡位之间差异显著（表3）。其中，上坡0~60 cm土层平均土壤含水量（0.191±0.044）$m^3 \cdot m^{-3}$显著高于中坡（0.158±0.045）$m^3 \cdot m^{-3}$，中坡显著高于下坡（0.146±0.034）$m^3 \cdot m^{-3}$，上坡、中坡和下坡的0~60 cm土层平均土壤含水量变化范围分别为0.132~0.278 $m^3 \cdot m^{-3}$、0.095~0.238 $m^3 \cdot m^{-3}$和0.097~0.210 $m^3 \cdot m^{-3}$。

土壤含水量随土层加深而逐渐增大（图1）。其中0~10、10~20 cm土层的土壤含水量波动剧烈，平均值分别为0.121 $m^3 \cdot m^{-3}$、155 $m^3 \cdot m^{-3}$，变化范围分别为0.065~0.222 $m^3 \cdot m^{-3}$、0.099~0.235 $m^3 \cdot m^{-3}$；20~40 cm、40~60 cm土层的土壤含水量对降雨响应不敏感，土壤含水量相对稳定，平均值分别为0.178 $m^3 \cdot m^{-3}$、0.206 $m^3 \cdot m^{-3}$，变化范围分别为0.117~0.243 $m^3 \cdot$

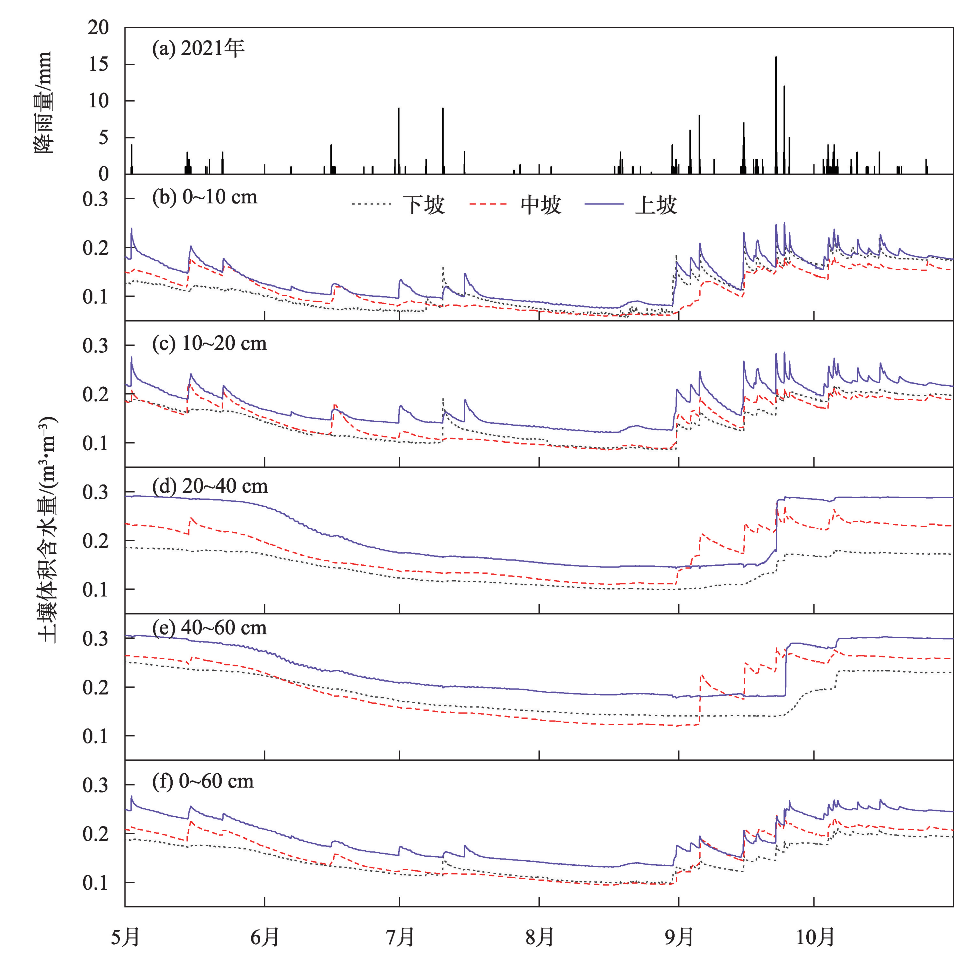


图1　2021年生长季内降雨分布及华北落叶松林坡面不同坡位各层土壤含水量动态变化

Fig. 1　Rainfall distribution in the growing season of 2021 and the variation of soil water content in different soil layers at different positions on the slope covered by *Larix principis-rupprechtii* plantations

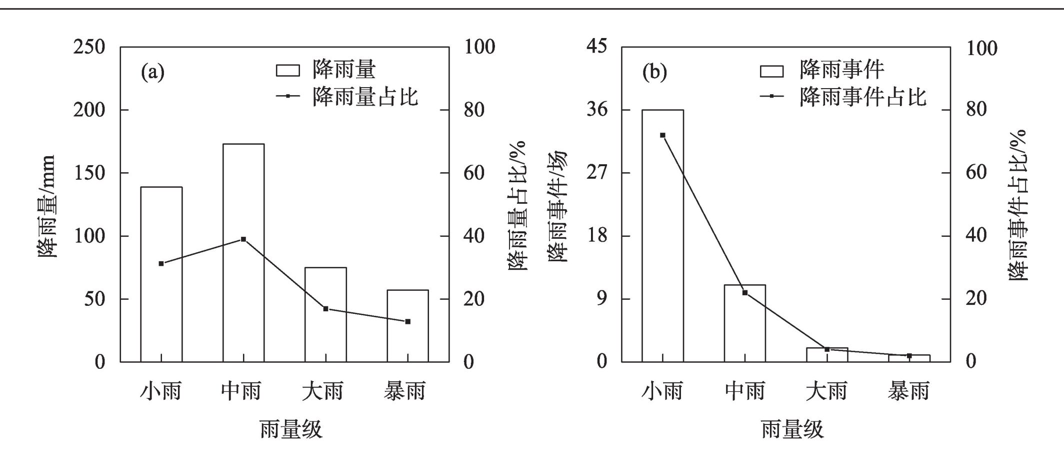


图2 2021年生长季内的降雨特征

Fig. 2 Rainfall characteristics during the 2021 growing season

表3 2021年生长季不同坡位处的各层土壤含水量特征

Tab. 3 Characteristics of soil water content in each layer at different slope positions in growing season of 2021

坡位	平均土壤含水量/(cm³·cm⁻³)				
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~60 cm
上坡	0.136±0.042Da	0.178±0.04Ca	0.215±0.061Ba	0.236±0.049Aa	0.191±0.044a
中坡	0.112±0.037Dc	0.145±0.04Cb	0.178±0.048Bb	0.197±0.055Ab	0.158±0.045b
下坡	0.115±0.043Cb	0.142±0.04Bc	0.141±0.031Bc	0.185±0.039Ac	0.146±0.034c

注:表中数据为平均值±标准差;同列内不同小写字母表示不同坡位之间在0.05水平上存在显著差异;同行内不同大写字母表示不同土层之间在0.05水平上存在显著差异。

m^{-3}、0.146~0.274 $m^3·m^{-3}$。

2.3 各层土壤含水量对降雨量的响应

2.3.1 小雨条件下的各层土壤含水量响应 由图3可知,10 mm以下的小降雨事件仅能补给0~20 cm土层的土壤水分,对20 cm以下土层无明显的水分补给作用。降雨的土壤水分补给在不同坡位之间有明显差异,小雨对上坡、中坡、下坡0~20 cm土层土壤水分均有补给作用,使每10 cm土层平均土壤水分分别增加3.4 mm、2.5 mm、3.0 mm。总体而言,小降雨事件的水分补给作用对上坡最强,其次是下坡,中坡最弱;同时,随着降雨量的增加,土壤水分的补给作用逐渐增强。

2.3.2 中雨条件下的各层土壤含水量响应 由图4可知,中雨(10~25 mm)对上坡、下坡20 cm以上土层均有明显的水分补给,但对20 cm以下土层土壤水分无明显补水作用;在中坡,对0~60 cm土层土壤水分均有明显补给。在中雨条件下,使上坡0~10 cm、10~20 cm土层土壤水分分别平均增加4 mm、3.8 mm;下坡相应土层土壤水分分别平均增加4.2 mm、1.5 mm;使中坡0~60 cm各层平均土壤水分每10 cm土层分别增加2.2 mm、2.3 mm、2.6 mm、3.6 mm。随着土层加深,上坡、下坡的土壤水分补给作用均逐渐减弱,但中坡的土壤水分补给作用逐渐增强。表明中坡的土壤含水量可能受到优先流或坡面径流汇集的影响。

2.3.3 大雨条件下的各层土壤含水量响应 大雨(25~50 mm)事件有2次,其对上坡、中坡和下坡0~60 cm土层的土壤水分有明显补给作用(图5a、图5b)。2次大雨事件对土壤水分补给作用在下坡(及41 mm降雨事件中的上坡)表现为随土层加深而减弱,但在中坡表现为随土层加深先增加后减少(34 mm降雨事件)或一直增加(41 mm降雨事件),在上坡表现为先减小后增加。

当单场降雨量为34 mm时,上坡0~60 cm各土层土壤水分分别增加7.0 mm、6.9 mm、0.6 mm、10.2 mm,中坡相应增加2.1 mm、2.4 mm、3.6 mm、2.0 mm,下坡相应增加7.6 mm、1.8 mm、1.3 mm、0.8 mm;当单场降雨量为41 mm时,上坡0~20 cm各土层土壤水分分别增加11.9 mm、11.2 mm,中坡0~60 cm各土层土壤水分分别增加5.0 mm、6.5 mm、6.1 mm、7.4 mm,

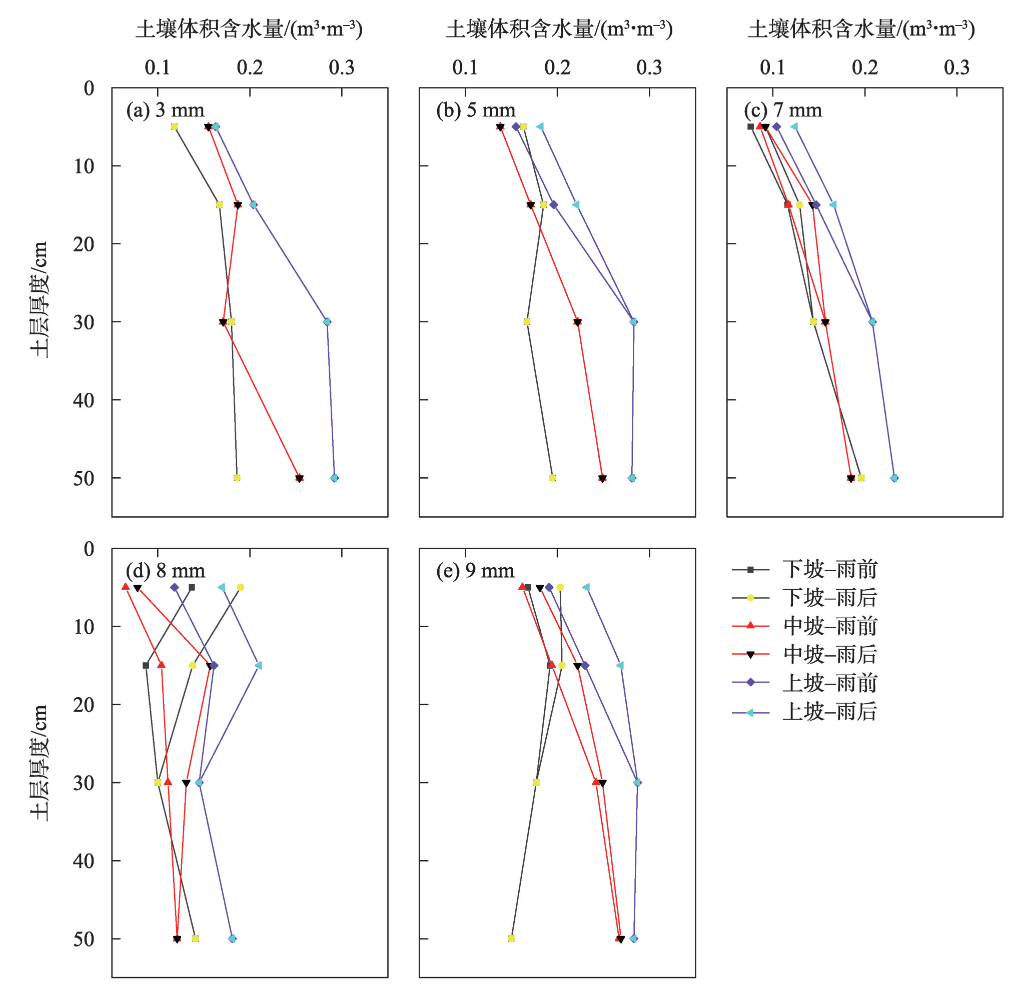


图3 小雨条件下各层土壤含水量对降雨量的响应

Fig. 3 Response of soil water content to rainfall depth under light rainfall events

下坡0~40 cm各土层土壤水分分别增加11.4 mm、3.9 mm、1.7 mm。表明中坡的(10~20 cm)土壤含水量在大雨条件下可能受到优先流或坡面径流汇集的影响。

2.3.4 暴雨条件下的各层土壤含水量响应 暴雨事件仅观测到1次,其降雨历时为4 h,降雨量为57 mm(图5c、图6),对上坡、下坡0~40 cm土层均有明显的土壤水分补给,但40 cm以下土层的土壤水分无响应;在中坡,对0~60 cm土层均有土壤水分补给作用。使上坡0~40 cm各层土壤水分每10 cm土层分别增加9.0 mm、8.5 mm、10.2 mm;下坡0~40 cm各层土壤水分每10 cm土层分别增加9.1 mm、4.4 mm、2.5 mm;中坡0~60 cm各层土壤水分每10 cm土层分别增加3.3 mm、3.7 mm、6.2 mm、4.9 mm。同时,随着土层深度增加,土壤含水量开始响应降雨的时间越来越滞后。

3 讨论

3.1 土壤含水量坡位差异的影响因素

在华北落叶松生长季内,坡面0~60 cm土层土壤含水量坡位差异显著,表现为:上坡位>中坡位>下坡位,这是因为土壤含水量受气象(降雨、气温、潜在蒸散等)、植被类型、林分结构以及土壤物理性质等多种因素的影响[14-15]。本研究区生长季降雨量443.7 mm,平均土壤含水量19.3%,是田间持水量(38.6%)的50%,属于干旱年,且研究坡面的高差相对较小(上下坡位样地的海拔高度仅差105 m),大气降水量输入基本一致。同时林分结构(林分密度、郁闭度、冠幅、林下草本盖度以及草本生物量等)表现为:下坡位>中坡位>上坡位(表1),林分蒸腾的坡位变化与林分结构一致[16];而0~60 cm土层土壤物理性质(饱和持水率、毛管持水率、田间持

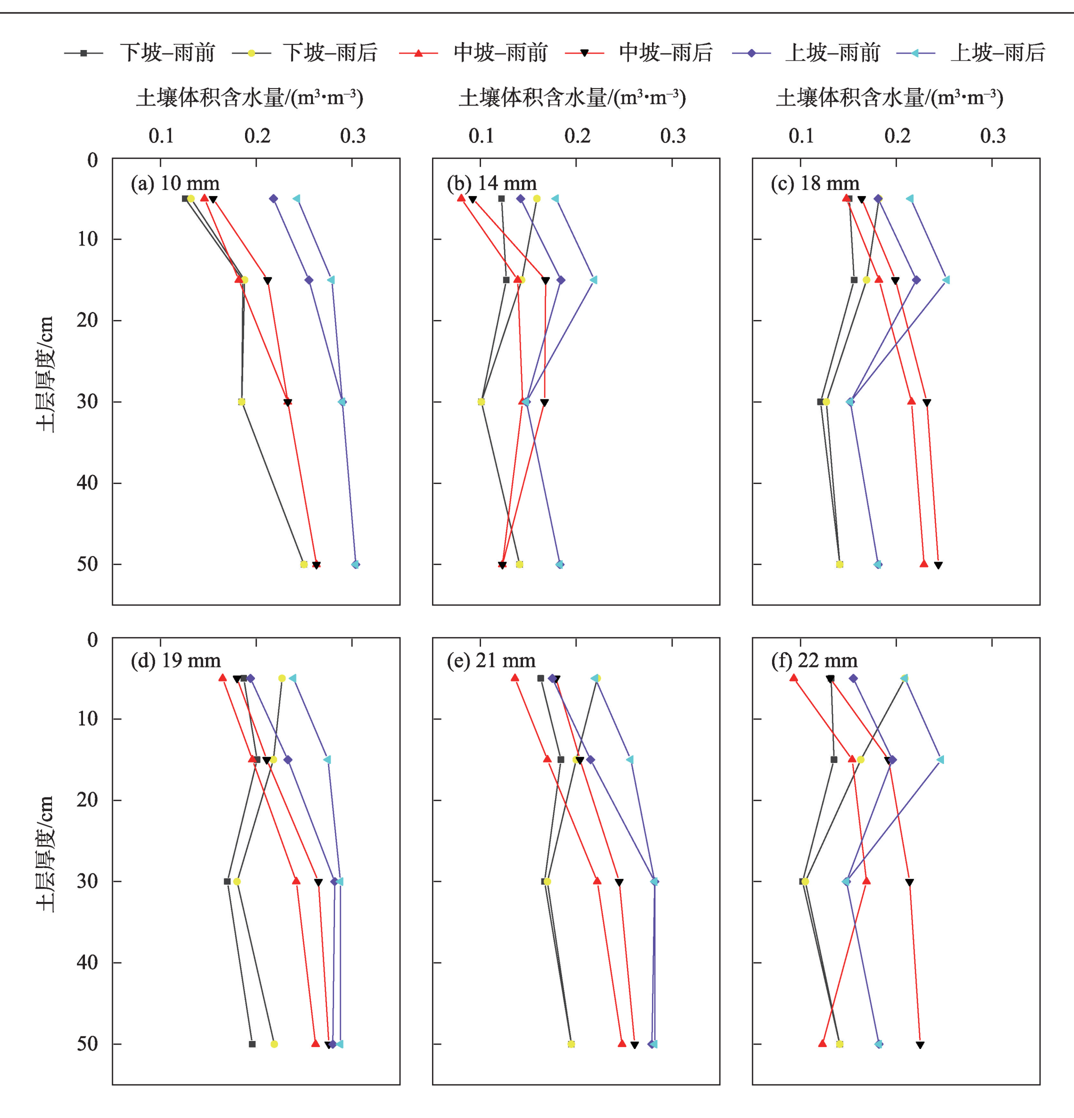


图4 中雨条件下土壤含水量对降雨量的响应

Fig. 4 Response of soil water content to rainfall depth under moderate rainfall events

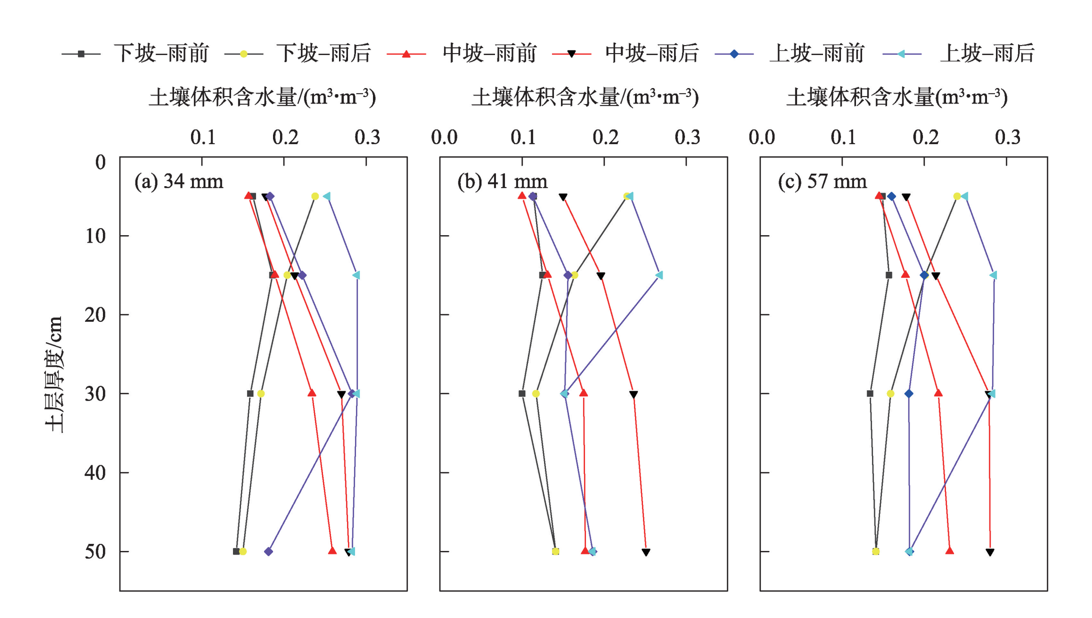


图5 大雨(a、b)、暴雨(c)条件下各层土壤含水量对降雨量的响应

Fig. 5 Response of soil water content to rainfall depth under heavy rain events (a, b) and rainstorm event (c)

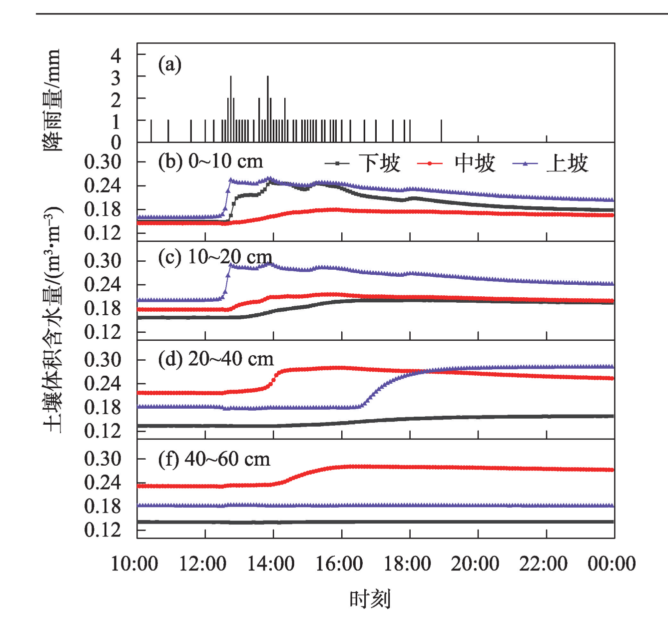


图6　不同坡位样地的各层土壤含水量对暴雨降雨过程的响应

Fig. 6　Response of soil water content in different soil layers at different slope positions to a rainstorm event

水率)对土壤含水量的坡位变化影响较小(表2)。因此,林分结构通过影响林分蒸腾,进而使得土壤含水量存在明显的坡位变化。苏子龙等[17]在典型黑土区的研究发现,土壤含水量在下坡最高、其次为上坡,中坡最低,这与本研究结果不同,可能是因为植被结构和土壤质地不同导致土壤持水能力存在坡位差异。刘泽彬等[18]在六盘山半湿润区研究了华北落叶松林坡面土壤含水量的时空变化,发现林分结构的坡位差异导致了植被蒸腾耗水量的不同,尤其在干旱年份土壤水分不足时,使植被蒸腾耗水成为导致土壤水分坡位差异的主要原因,这与本研究结果一致。因此,土壤水分的坡位差异主要是由植被蒸散耗水量的坡位差异所导致的。

3.2　不同的次降雨量对坡面土壤水分的补给差异

大气降雨对土壤水分的补给量和水分入渗深度均受降雨量、降雨强度、降雨历时和前期土壤含水量的主导调控[19-20],同时植被截留、根系分布和土壤物理性质等因素也能影响土壤水分再分配[21-22]。10 mm以下的小降雨事件仅能补充浅层(0~20 cm)土壤水分,大降雨事件才能影响到20~40 cm和40~60 cm土层的土壤水分,这是因为华北落叶松林的冠层和林下草本层(及枯落物层)对降雨有较大截留作用[23]。本研究发现,在小降雨事件中,当降雨量达到7 mm时,浅层土壤水分才明显增加,这与王正安等[10]的研究结果一致。但赵荣玮等[24]研究黄土区人工林土壤水分的降雨响应时发现,在降雨量9.6 mm的小降雨事件下,人工侧柏纯林和混交林20 cm以上土层的土壤水分均有响应,而人工刺槐林仅在10 cm土层以内的土壤水分有响应,这与本研究结果存在差异,这主要是因为研究区域、研究树种、林分结构等存在不同,从而导致林冠层和枯落物层对降雨截持能力产生差异,使达到土壤表面的雨量不同。因此,对本研究地点的林地而言,只有降雨量达到7 mm时才算是有效降雨。

本研究还发现,当降雨量超过有效降雨阈值时,随着降雨量增加,土壤水分的补给深度和补给量逐渐增加。同一降雨事件的土壤水分补给作用在不同坡位有明显差异,小雨对上坡土壤水分的补给作用最强,其次是下坡,中坡的补给作用最弱,这可能与中坡树木生长最好和枯落物层生物量最大有关(表1),因为乔木冠层截持和枯落物层截持降雨会降低到达矿质土壤地表的有效雨量。中雨(10~25 mm)只增加了中坡20~60 cm土层土壤含水量,对上坡、下坡的20 cm以下土层的土壤水分却无明显补给作用,这一方面可能是因中坡土壤毛管孔隙度较小和土壤持水能力较差(表2),从而有利于降雨过程中的土壤水分下渗的更深;另一方面,中坡样地土壤的非毛管孔隙度较高,即土壤大孔隙发达,因此较深土层的土壤含水量可能受到优先流的影响,或同时受沿坡面向下汇集的坡面径流的影响,在研究结果部分也看到了在大雨、暴雨及部分中雨条件下(可能取决于前期土壤含水量大小)的中坡10~20 cm及40~60 cm土层的土壤水分补给量大于其上面土层水分补给量的情况。

4　结　论

在2021年生长季(5—10月)对六盘山半干旱区叠叠沟小流域华北落叶松人工林典型坡面不同坡位(上坡、中坡、下坡)0~60 cm土层土壤含水量的研究表明:

(1) 生长季内土壤含水量呈先降低后升高的季节变化,在5—8月逐渐降低,其平均值为0.149 $m^3 \cdot m^{-3}$;在9—10月逐渐上升,其平均值为0.196 $m^3 \cdot m^{-3}$。

(2) 土壤含水量存在明显的坡位差异,具体表现为上坡最高(0.191±0.044) $m^3 \cdot m^{-3}$、中坡次之

(0.158±0.045)$m^3 \cdot m^{-3}$、下坡最低(0.146±0.034)$m^3 \cdot m^{-3}$。因本研究年份5—8月降雨稀少，植被蒸腾量大，引起土壤含水量坡位差异的主要原因是植被蒸腾的坡位差异。

（3）在相同次降雨量条件下，土壤含水量对降雨量的响应存在坡位差异，中坡最敏感，其次是上坡，下坡最不敏感，这主要与土壤物理性质（孔隙度、持水率）、林分结构、林地枯落物层生物量等的坡位差异有关。

（4）研究区的降水以 < 10 mm的小降雨事件为主。降雨量达到7 mm后即可明显补充0~20 cm土层的土壤水分，土壤水分的补给深度和补给量随着降雨量增加而逐渐增加。在大雨和暴雨条件下，优先流和坡面汇流对土壤含水量的影响可能在某些坡位的某些土层出现，尤其是坡面中部。

参考文献(References)：

[1] Zhang Z S, Li X R, Liu L C, et al. Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, Northwestern China[J]. Journal of plant research, 2009, 122(1): 109–119.

[2] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149–156. [He Qihua, He Yonghua, Bao Weikai. Reserch on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. Mountain Reserch, 2003, 21(2): 149–156.]

[3] 周海, 赵文智, 何志斌. 两种荒漠生境条件下泡泡刺水分来源及其对降水的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2083–2092. [Zhou Hai, Zhao Wenzhi, He Zhibin. Water sources of *Nirtaria sibirica* and response to precipitation in two desert habitats[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2083–2092.]

[4] 李新乐, 吴波, 张建平, 等. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5701–5708. [Li Xinle, Wu Bo, Zhang Jianping, et al. Dynamics of shallow soil water content in *Nitraria tangutorum* nebkha and response to rainfall [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5701–5708.]

[5] 何子淼, 肖培青, 郝仕龙, 等. 黄丘区野外坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 16–24. [He Zimiao, Xiao Peiqing, Hao Shilong, et al. Response of soil moisture variation to individual rainfall on the field slope in the loessial hilly-gully region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 16–24.]

[6] 邱德勋, 赵佰礼, 尹殿胜, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(3): 72–80. [Qiu Dexun, Zhao Baili, Yin Diansheng, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and gully region and its influence factors [J]. Science of Soil Water Conservation, 2021, 19(3): 72–80.]

[7] 李亚新, 陈伟, 孙从建, 等. 黄土丘陵区农耕地与撂荒地土壤水分特征及对降雨的响应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 114–120. [Li Yaxin, Chen Wei, Sun Congjian, et al. Soil moisture characteristics and their response to rainfall in cultivated land and abandoned land in loess hilly region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 114–120.]

[8] 李龙, 张志华, 桑玉强, 等. 太行低山区荆条土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5752–5758. [Li Long, Zhang Zhihua, Sang Yuqiang, et al. Soil moisture dynamics of *Vitex negundo* and its response to different rainfall events in hilly region of Taihang Mountains[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5752–5758.]

[9] 罗叙, 李建平, 张翼, 等. 荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 142–150, 158. [Luo Xu, Li Jianping, Zhang Yi, et al. Response of spatial and temporal variation of soil moisture to precipitation change in desert steppe [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 142–150, 158.]

[10] 王正安, 邸利, 王彦辉, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分对降雨的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 144–151. [Wang Zheng'an, Di Li, Wang Yanhui, et al. Response of soil moisture to rain falls in a semi-arid larch forest in Liupan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 144–151.]

[11] 樊亚鹏, 扈花, 王蕾, 等. 六盘山半湿润区华北落叶松林土壤含水量的降雨响应[J]. 宁夏农林科技, 2019, 60(12): 15–19, 21. [Fan Yapeng, Hu Hua, Wang Lei, et al. Response of soil moisture to precipitation of *Larix principis-rupprechtii* mayr plantation in a semi-humid zone in Liupan Mountains[J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2019, 60(12): 15–19, 21.]

[12] 段旭. 六盘山地区水文要素坡面变化[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011. [Duan Xu. The Variation of Hydrological Factors on Slopes in the Region of Liupan Mountains[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2011.]

[13] Zhu Q, Nie X F, Zhou X B, et al. Soil moisture response to rainfall at different topographic positions along a mixed land-use hillslope [J]. Catena, 2014, 119:61–70.

[14] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(4): 723–750.

[15] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(6): 707–718.

[16] 李振华. 六盘山叠叠沟典型植被蒸散及水文要素的坡面尺度效应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014. [Li Zhenhua. The Evapotranspiration of Typical Vegetation and the Scale Effect of

the Hydrologic Features in Slopes of Diediegou Watershed of Liupan Mountains[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2014.]

[17] 苏子龙, 张光辉, 于艳. 典型黑土区农业小流域不同坡向和坡位的土壤水分变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(6): 39–44. [Su Zilong, Zhang Guanghui, Yu Yan. Variation of soil moisture with slope aspect and position in a small agricultural watershed in the typical black soil region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(6): 39–44.]

[18] 刘泽彬, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华北落叶松林坡面土壤含水量的时空变化[J]. 山地学报, 2018, 36(1): 43–52. [Liu Zebin, Wang Yanhui, Xu Lihong, et al. Spatial-temporal variations and scale effect of soil moisture on *Larix principis-ruprechtii* plantation slope in semihumid Liupan Mountains[J]. Mountain Reserch, 2018, 36(1): 43–52.]

[19] 陈敏玲, 张兵伟, 任婷婷, 等. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应[J]. 植物生态学报, 2016, 40(7): 658–668. [Chen Minling, Zhang Bingwei, Ren Tingting, et al. Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grasslangs in Nei Mongol, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(7): 658–668.]

[20] Wang S, Fu B J, Gao G, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, 101(3): 122–128.

[21] 王海梅, 侯琼, 冯旭宇, 等. 自然降雨过程对典型草原土壤水分的影响研究——以锡林浩特为例[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 1010–1015. [Wang Haimei, Hou Qiong, Feng Xuyu, et al. Effect of different magnitude rainfall process on soil moisture in typical grasslang of Xilinhot of Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6): 1010–1015.]

[22] Yaseef N R, Yakir D, Rotenberg E, et al. Ecohydrology of a semi-arid forest: Partitioning among water balance components and its implications for predicted precipitation changes[J]. Ecohydrology, 2010, 3(2): 143–154.

[23] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1571–1578. [Wang Bo, Duan Yuxi, Wang Weifeng, et al. Responses of shallow soil water content in *Artemisia ordosica* community to different rainfall patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1571–1578.]

[24] 赵荣玮, 张建军, 李玉婷, 等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 178–183. [Zhao Rongwei, Zhang Jianjun, Li Yuting, et al. Soil moisture characteristic and its response to rainfall in artificial forests in Loess region of Western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 178–183.]

Rainfall response of soil water content on a slope of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the semi-arid Liupan Mountains

SHI Jianzhou[1,2], LIU Xiande[1,3], TIAN Qing[1], YU Pengtao[2], WANG Yanhui[2]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: In the semi-arid zone of the Liupan Mountains in Ningxia, soil water content is a key factor affecting the survival and growth of trees, and it is necessary to understand the differences in soil water content on different slope positions of forested slopes and their response to different rainfall amounts. For this purpose, a typical slope covered by *Larix principis- rupprechtii* plantations was selected in the small watershed of Diediegou in the Liupanshan Mountains. From May to October 2021, meteorological conditions (such as precipitation) and changes in soil water content on this slope were continuously monitored with automatic weather stations and soil moisture meters to analyze the differences in soil water content on the slopes and their response to the depth of individual rainfall events. The total precipitation depth during the monitoring period was 443.7 mm, which was close to the long-term annual average, but with severe drought in summer. The results showed the following: (1) The soil water content varied significantly within the growing season; the overall level first decreased and then increased, being the lowest in August (0.112 $m^3 \cdot m^{-3}$). (2) There were clear differences in soil water content among slope positions, generally in the order upper slope [(0.191 ± 0.044) $m^3 \cdot m^{-3}$] > middle slope [(0.158 ± 0.045) $m^3 \cdot m^{-3}$] > lower slope [(0.146 ± 0.034) $m^3 \cdot m^{-3}$]. This indicated that the main factor influencing the differences in soil water content along slope positions is the amount of evapotranspiration by forest/vegetation, rather than the redistribution of rainwater along the slope by slope runoff in this dry year. (3) To the same rainfall depth, the response of soil water content on the middle slope was the most sensitive, followed by that on the upper slope, and the lower slope was the least sensitive, owing to the integrated effects of soil porosity, water-holding capacity, and understory vegetation. (4) At the study site, rainfall was dominated by small rainfall events below 10 mm, with 7 mm representing the threshold for effective rainfall, above which the rainfall is likely to alleviate the soil dryness and recharge the soil moisture in the soil layer of 0−20 cm. The results of this study can aid understanding of the variation and spatial distribution of soil water content on forest slopes in semi- arid mountainous areas and help determine the water-carrying capacity of forest/vegetation and integrated

Keywords: semi-arid zone; Liupan Mountains; *Larix principis-rupprechtii*; soil water content; slope position difference; soil moisture recharge by rainwater